

(一財) 港湾空港総合技術センター
平成31年度 研究開発助成 成果報告書

助成番号 : 平成31年2月25日付 第20—7号

研究開発項目 : ⑨ その他、当センターの目的に合致するものに関するもの

全球波浪予報値と機械学習法を用いた
1週間先までの高精度日本沿岸波浪
予測モデルの開発

令和2年4月30日

京都大学防災研究所

間瀬 肇

目次

1. はじめに	1
2. 全球波浪予報値とGMDHを用いた1週間波浪予測法とその精度検証	2
2.1 目的	2
2.2 GMDHを用いる波浪予測手法	2
(1) GMDH の概要	2
(2) GMDH を用いる波浪予測手法	4
(3) 検証用 GMDH モデルの構築	5
2.3 算定結果と観測結果の比較	6
2.4 まとめ	11
3. 全球波浪予報値とニューラルネットワークを用いた1週間波浪予測法とその精度検証	11
3.1 目的	11
3.2 NN による1週間波浪予測	12
(1) 本研究で用いるNNの構成	12
(2) 用いる全球波浪データ	13
(3) 解析条件	13
3.3 解析結果	14
3.4 まとめ	17
4. おわりに	17

1. はじめに

波浪予測は、定期船の運航、沿岸・沖合漁場への出漁、港湾・海洋工事の作業実施および海水浴・サーフィン・ヨット等の海域利用などの可否判断、さらには台風等の荒天時における高波のリアルタイム把握などに用いられている。これらは、数時間から 1 日程度先の予測がよく用いられ、長くてもおおむね 3 日（72 時間）先までの短期予測があればよい。この短期予測に関する研究は、従来より多く実施されている（例えば、Tomら¹⁾、鈴木ら²⁾、間瀬ら³⁾）。

青野ら⁴⁾ は、観測波浪データを用いて 24 時間先まで予測可能な重回帰波浪予測モデルを提案したが、ケーソン据え付けなどの大規模海上工事では 1 週間程度の波浪予測が必要であることを述べている。このように、作業船やケーソン等の回航、洋上風力発電施設、GPS波浪計、沖合漁礁の設置や維持管理、遠隔離島における工事など、陸から遠い沖合を対象とした場合には、できるだけリードタイムの長い気象・海象予測情報が求められる。例えば、洋上風力発電装置（着底式）の設置にあたっては、陸上で製作した部材の海上運搬、基礎構造物の施工、タワーの据付け、風車本体の施工（タワー、ナセル、ハブ、ブレード）、海底ケーブルの敷設といった工種がある。これらの工種の中には数日間連続して作業を実施しなければならないものがあり、おおむね 1 週間（168時間）先までの波浪の中期予測が必要となる。

現状、1週間先までの波浪の中期予測は、全球モデルによって行われている。この中期予測は、日本、米国、欧州の3つの機関が実施しており、我が国の気象庁では、全球波浪数値予報モデル GPV (JMA GWM) と波浪アンサンブルモデル GPV (JMA WEM)、アメリカ海洋大気庁では、波浪モデルに WAVEWATCH III を用いた multi_1 (NOAA WW3)、ヨーロッパ中期予報センターでは、波浪モデルに WAM を用いた HRES-WAM (ECMWF HRES-WAM) が挙げられる。ただし、これらの全球波浪予報値は空間解像度が低いため、日本沿岸の波浪予測値としては十分な精度を期待することはできず、作業船の準備や港湾・海洋工事の施工計画のための 1 週間先までの中期波浪予測としては不十分であるといった問題がある。

津田ら⁵⁾ は、ニューラルネットワーク法を用いて、数ヶ所の海象・気象観測データ（有義波高や周期、波向、風速や風向、気圧、同一地点の 1 時間の気圧差、2 地点間の同時刻の気圧差）を入力として 1 週間先までの波浪予測を行っている。予測対象とした常陸那珂港においては精度の高い予測が行われているものの、観測値を入力としているため欠測時に予測値が得られない、出力毎にニューラルネットワークモデルを作成する必要があり計算負荷が大きい、予測対象地点が変わった場合にどの地点の海象・気象データを入力として使用すればよいかを出力ごとに試行錯誤する必要がある、予測値にスパイクノイズが現れるといった問題がある。

作業船やケーソン等の回航、洋上風力発電施設・GPS波浪計・沖合漁礁の設置や維持管理、遠隔離島における工事など、陸から遠い沖合を対象とした場合には、できるだけリードタイムの長い（約1週間先までの）気象・海象予測情報が求められる。このようなリードタイムの長い波浪予測としては、

全球波浪予報値が提供されている。しかし、現状の全球波浪予報値は空間解像度が低いため、高い空間解像度を必要とする日本沿岸の波浪予測値として十分な精度を期待することはできない。すなわち、現状においては、1週間先までの中期波浪予測の精度は定かではなく、また日本沿岸の1週間先までの精度の良い波浪予測法はない。そのため、複数の機関による全球波浪予報値を基にして、対象とする日本沿岸の同時刻の波浪観測値を出力変数として、GMDH部分表現式およびANNを用いた波浪予測法の精度を、第2章と第3章で調べた。

2. 全球波浪予報値とGMDHを用いた1週間波浪予測法とその精度検証

2.1 目的

対象とする日本沿岸の波浪を精度よく予測する方法として、複数機関の全球波浪予報値を入力とする機械学習の波浪予測モデルが考えられる。これは、日本沿岸のある地点に対して、空間解像度が低い複数機関の全球波浪予報値と波浪観測値との間にあると考えられる非線形な関係を機械学習により導き出し、単一機関の全球波浪予報値よりも精度の高い日本沿岸の波浪予測を行うものである。

本章では、機械学習手法に、Ivakhnenko によって開発されたGroup Method of Data Handling^{6),7)} (以下、GMDH と略す) を採用する。GMDH は、複雑な構造をもった非線形システムに対して、入出力データから発見的自己組織化の原理に基づいてモデリングを行う。入力変数が多い場合には、ニューラルネットワーク法と同じように、入力と出力の因果関係をブラックボックスで結びつけることができる一方、入力変数が少ない場合には、陽な関係式によって入出力関係を表現することができる。したがって、入力変数が2,3種類の場合におけるGMDHによる陽な関係式を得ることができれば、入力変数を代入するだけで簡単に1週間先までの予測値を求めることができる。さらに、GMDHの利点として、その係数を調べれば、どの入力変数の影響が大きいのかも評価することができる点が挙げられる。

そこで、本研究では、ナウファス⁸⁾などの波浪観測地点における日本、米国、欧州の全球波浪予報値を入力変数とするGMDHによる1週間先までの波浪予測モデルを提案する。そして、その精度検証により、作業船の準備や港湾・海洋工事の施工計画に有用な波浪予測手法を確立することを目指す。

2.2 GMDHを用いる波浪予測手法

(1) GMDH の概要

GMDH は複雑な構造をもった非線形システムに対して、入出力データから発見的自己組織化の原理に基づいてモデリングを行うものであり、1) 数少ない入出力データで非線形システムのモデリングを手軽に行うことができる、2) システムの構造に関する先見的な情報を必要とすることなくモデル構造の自己選択が可能である、といった特徴を有する(田村, 近藤⁹⁾)。

いまシステムの入力変数 $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ と出力変数 ϕ との間に以下の関係(システムの完全表現

式) があるとする.

$$\phi = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (1)$$

システムの完全表現式として, 多項式, Bayes 関数, 周期関数, 有理関数等があるが, 最も多く用いられているのは, 以下の Kolmogorov-Gabor の多項式である.

$$\phi = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i x_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots (2)$$

ここで, $a_0, a_i, a_{ij}, a_{ijk}$ は定数項である.

式 (2) の多項式は, N 種類の変数から2つの x_i, x_j を用いた 2 次多項式

$$y_k = b_{k0} + b_{k1}x_i + b_{k2}x_j + b_{k3}x_i x_j + b_{k4}x_i^2 + b_{k5}x_j^2 \quad (3)$$

$$k = 1, 2, \dots, N(N-1)/2$$

で表される中間変数 y_k を新たな入力変数として式(3)の右辺に用い, 新たな2次多項式とする. この過程を進めて完全表現式に近づける (この後で示す, ステップ5). $b_{k0}, b_{k1}, \dots, b_{k5}$ は定数項である. この中間変数 y_k は $N(N-1)/2$ 個できる. 式 (3) は, 部分表現式と呼ばれ, 式 (2) に比べて非常に簡単なコーディングで済む利点を有する.

この部分表現式を用いる GMDH のアルゴリズムは, 以下の通りである.

a) ステップ 1

システムの入出力変数を決定する.

b) ステップ 2

入出力データを訓練に使うデータ (個数 N_t) と中間変数の選択に用いる検定データ (個数 N_c) に分ける. 適合性判定は検証データ (個数 N_p) に対して行う.

c) ステップ 3

2 変数の組み合わせを作り, 訓練データを用いて式(3)の部分表現式の係数 $b_{k0}, b_{k1}, \dots, b_{k5}$ を, y_k を用いた N_t 個の推定値と与えられた N_t 個の出力値 ϕ_n との差の自乗和 e_{TRN} が最小になるように求める.

$$e_{TRN} = \sum_{n=1}^{N_t} (\phi_n - y_{kn})^2 \rightarrow \partial e_{TRN} / \partial b_{ki} = 0 \quad (4)$$

これは以下の連立方程式を解いて求められる.

$$\sum_{n=1}^{N_t} \left\{ b_{k0} + b_{k1}x_{in} + b_{k2}x_{jn} + b_{k3}x_{in}x_{jn} + b_{k4}x_{in}^2 + b_{k5}x_{jn}^2 \right\} = \sum_{n=1}^{N_t} y_{kn} \quad (5)$$

$$\sum_{n=1}^{N_t} \left\{ b_{k0}x_{in} + b_{k1}x_{in}^2 + b_{k2}x_{in}x_{jn} + b_{k3}x_{in}^2x_{jn} + b_{k4}x_{in}^3 + b_{k5}x_{in}x_{jn}^2 \right\} = \sum_{n=1}^{N_t} y_{kn}x_{in} \quad (6)$$

$$\sum_{n=1}^{N_i} \left\{ b_{k0} x_{jn} + b_{k1} x_{in} x_{jn} + b_{k2} x_{jn}^2 + b_{k3} x_{in} x_{jn}^2 + b_{k4} x_{in}^2 x_{jn} + b_{k5} x_{jn}^3 \right\} = \sum_{n=1}^{N_i} y_{kn} x_{jn} \quad (7)$$

$$\sum_{n=1}^{N_i} \left\{ b_{k0} x_{in} x_{jn} + b_{k1} x_{in}^2 x_{jn} + b_{k2} x_{in} x_{jn}^2 + b_{k3} x_{in}^2 x_{jn}^2 + b_{k4} x_{in}^3 x_{jn} + b_{k5} x_{in} x_{jn}^3 \right\} = \sum_{n=1}^{N_i} y_{kn} x_{in} x_{jn} \quad (8)$$

$$\sum_{n=1}^{N_i} \left\{ b_{k0} x_{in}^2 + b_{k1} x_{in}^3 + b_{k2} x_{in}^2 x_{jn} + b_{k3} x_{in}^3 x_{jn} + b_{k4} x_{in}^4 + b_{k5} x_{in}^2 x_{jn}^2 \right\} = \sum_{n=1}^{N_i} y_{kn} x_{in}^2 \quad (9)$$

$$\sum_{n=1}^{N_i} \left\{ b_{k0} x_{jn}^2 + b_{k1} x_{in} x_{jn}^2 + b_{k2} x_{jn}^3 + b_{k3} x_{in} x_{jn}^3 + b_{k4} x_{in}^2 x_{jn}^2 + b_{k5} x_{jn}^4 \right\} = \sum_{n=1}^{N_i} y_{kn} x_{jn}^2 \quad (10)$$

d) ステップ 4

得られた部分表現式により，検定データに対する2乗誤差 e_{CHK} が小さいものから順に L 種類の間変数を選択する．

$$e_{CHK} = \sum_{n=1}^{N_c} (\phi_n - y_{kn})^2 \quad (11)$$

e) ステップ 5

$x_i = y_i$ ， $x_j = y_j$ としてステップ 3 と 4 の操作を繰り返し，2 変数の 2 次多項式を多層に積み重ねて，検定データに対する自乗誤差が改善されなくなったところでこの操作を打ち切る．なお，入力変数を 2 種類だけ用いる場合，式 (11) のように誤差が小さくなるものを選ぶ必要なく，式 (3) の 2 変数を用いた部分表現式がそのまま予測式となる．

(2) GMDH を用いる波浪予測手法

本研究で提案する式 (3) の GMDH 部分表現式を用いる波浪予測手法の出力変数 ϕ は，ナウファスの有義波高 H_s と有義波周期 T_s の 2 種類である．出力変数 H_s に対する入力変数は，全球波浪予報値の同時刻における波高とする．同様に，出力変数 T_s に対する入力変数は，全球波浪予報値の同時刻における周期とする．

実際の運用では，入力変数に用いる全球波浪予報値は，リアルタイムで入手可能な JMA GWM (H_s , T_p)，NOAA WW3 (H_s , T_{m02})，ECMWF HRES-WAM (H_s , T_{m01}) の 3 種類を想定している．したがって，式(1)~(3) の N は 2 あるいは 3 である．ここに， T_p は卓越波向きのエネルギースペクトルが最も大きくなる周期， T_{m02} はスペクトルの 0 次および 2 次モーメントから得られる平均周期， T_{m01} はスペクトルの 0 次および 1 次モーメントから得られる平均周期である．それぞれの予報値で用いられてい

る周期は有義波周期ではない点に注意されたい。これら全球波浪予報値の格子間隔，計算領域，周波数・方向スペクトルの分割数，予報サイクル，予報時間長さ，予報時間間隔，波浪計算に用いる気象データを表-1 に示す。予報時間長さは最も短いもので 180 時間あり，いずれも1 週間（168時間）以上の予報値を有する。なお，先に示した JMA WEM は提供開始が 2017 年12月からと現段階ではデータ数が少ないため，本研究では用いていない。

表-1 全球波浪予報値の概要

	JMA GWM	NOAA WW3	ECMWF HRES-WAM
Grid Interval	0.5° x 0.5°	0.5° x 0.5°	0.125° x 0.125°
Calculation Area	Global 75°N - 75°S	Global 77.5°N - 77.5°S	Global (computed 90°N - 78°S) output artificially 90°N - 90°S
Spectral Component	25 frequencies 36 directions	50 frequencies 36 directions	36 frequencies 36 directions
Forecast Cycle	4 times/day	4 times/day	2 times/day(00,12)
Forecast Length	264 hours (12UTC) 132 hours (others)	0 to 180 hours	0 to 240 hours
Forecast Interval	Every 3 hours	Every 1 hour 0 to 120 Every 3 hours 123 to 180	Every 3 hours 0 to 144 Every 6 hours 150 to 240
Surface Forcing	GSM (20 km grid)	GFS (0.5° x 0.5°) 1hr increments	HRES atmospheric component 0.1° x 0.1°
Supporting Document	http://www.jmbisc.or.jp/jp/online/file/f-online20100.html	http://polar.ncep.noaa.gov/waves/implementations.php	https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/set-ii https://www.ecmwf.int/en/forecasts/documentation-and-support/2d-wave-spectra

実際の運用では，3 種類の全球波浪予測値が配信される 6 時間ないし 12 時間毎に，図-1中の黄色で囲んだ部分の希望する時点（例えば，24, 72, 120, 168時間後）における全球波浪予報値を指定すれば，その時刻における日本沿岸波浪の予測を得ることができる。

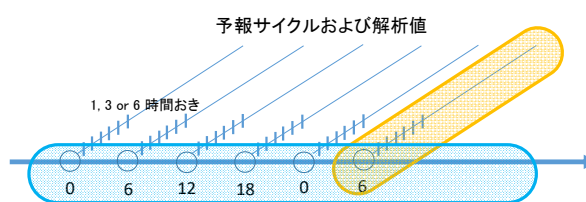


図-1 全球波浪モデルによる予報値と解析値の関係

(3) 検証用 GMDH モデルの構築

前節で述べたことが可能であるかを検証するため，過去の予報の初期値と解析値（図-1中の水色で囲んだ部分の値（配信時刻における0時間後の予測値）を入力変数とし，ナウファスの波浪観測値を出力変数として，GMDH モデルを構築する。

ここで用いる波浪データは，JMA GWM と NOAA WW3 は予報の初期値，ECMWF は ERA5 (ECMWF ERA5) の解析値の 3 種類とした。ECMWF ERA5 を用いたのは，過去の解析値が ECMWF

HRES-WAM より入手が容易であったことによる。なお、ECMWF ERA5 が ECMWF HRES-WAM と異なるのは、格子間隔が $0.36^{\circ} \times 0.36^{\circ}$ 、周波数・方向スペクトルの分割数がそれぞれ 30 と 24、外力の格子間隔が $0.281^{\circ} \times 0.281^{\circ}$ となる点である。

本研究の最終目的は、6 時間おきに配信される全球波浪予報値を使って、日本沿岸の対象地点における波浪予測値に変換することである。こうしたことができるかを確かめるためにまずは入手が容易な過去の予報初期値と解析値を利用した。

今回用いた全球波浪解析値と波浪観測値の期間は、UTC時刻で 2010年1月1日から 2015年12月31日の 6 年間で、時間間隔は 6 時間とした。また、検討対象とした日本沿岸の地点は、ナウファスの常陸那珂である。常陸那珂の波浪計設置位置は (36.395°N , 140.653°E)であったため、波浪解析値の出力位置として、JMA GWM (36.5°N , 141.0°E)、NOAA WW3 (36.5°N , 141.0°E)、ECMWF ERA5 (36.36°N , 140.76°E) を採用した。

GMDH モデルを構築するに当たり、訓練データとして 2010年1月1日から 2013年12月31日の4年間、検定データとして 2014年1月1日から 12月31日の1年間、検証データとして 2015年1月1日から 2015年12月31日の1年間のデータに分割して用いた。さらに、「GMDH のステップ 4」では、 $e_{CHK} \geq 10^{20}$ を超えた中間変数は次のステップの対象から除いた。

GMDH モデルを作成したのは、表-2 に示すように、3種類の波浪解析値のうち 2 種類を組合せたものと、3種類全部用いたものの合計 4 ケースである。それぞれのケースについて、 H_s 用と T_s 用の2種類のモデルを作成した。

表-2 作成したGMDHモデルの入出力の組合せ

No.	入力変数	出力変数
1	JMA GWM + NOAA WW3	ナウファス
2	JMA GWM + ECMWF ERA5	ナウファス
3	NOAA WW3 + ECMWF ERA5	ナウファス
4	JMA GWM + NOAA WW3 + ECMWF ERA5	ナウファス

2.3 算定結果と観測結果の比較

まず初めに、JMA GWM、NOAA WW3 および ECMWF ERA5 のそれぞれの解析値が、常陸那珂における観測値をどの程度再現できているかを調べる。

図-2 に全球波浪データと観測値の比較図を示す。(a)図は有義波高 H_s について、(b)図は周期 (横軸:有義波周期 T_s) について比較したものである。左から右に、JMA GWM、NOAA WW3、ECMWF ERA5 の結果を示してある。また、それぞれの図には解析値と観測値の相関係数 CC と自乗平均平方根誤差 RMSE を示してある。

これらの図を見ると、JMA GWM および NOAA WW3 のデータは、 H_s および T_s ともに観測値よりかなり大きくなっている。ECMWF ERA5 の解析値を観測値と比較した結果、 H_s では相関係数 $CC = 0.896$ 、2乗平均平方根誤差 $RMSE = 0.293 \text{ m}$ と良い一致を示しているが、 T_s については、 $CC = 0.748$ 、 $RMSE = 1.693 \text{ s}$ となって小さめである。しかし、一般的には全球スケールの波浪予報値はその空間解像度のために、局所スケールの波浪の予測値としては精度が落ちると考えられる。そこでここでは GMDH を用いて局所スケールの波浪予測精度の向上を目指す。

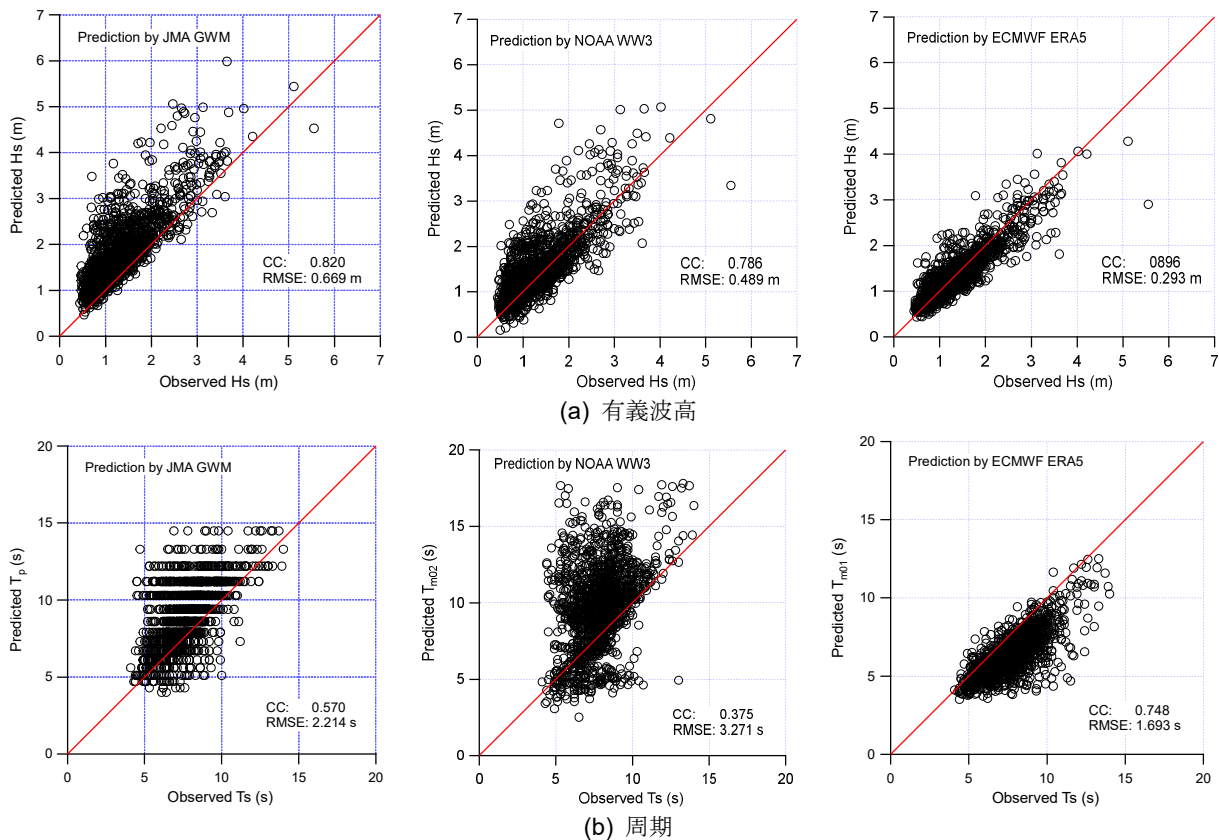


図-2 個々の全球波浪解析値と観測値との比較 (常陸那珂)

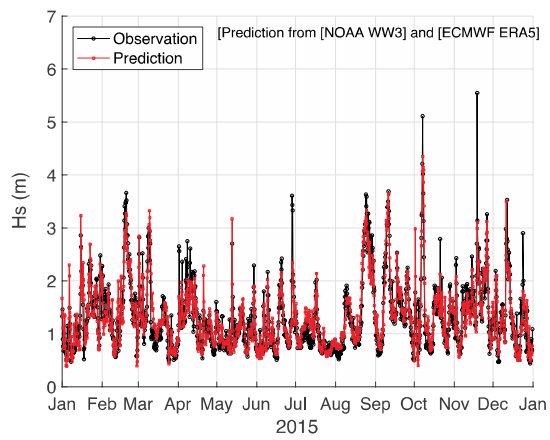
以下では、GMDHにより求めた値を「算定値」と称する。「予測値」は、将来の値を前もって推測した値である。本研究の最終目的は、全球波浪予報値を用いてその時刻での日本沿岸対象地点における波浪を算定するものであり、その場合には「予測値」とするが、本研究では過去の予報初期値と解析値を用いており将来の値ではないので、「算定値」を用いることとする。

図-3 と図-4 は 2 種類の全球波浪解析値を用いた算定値との比較結果を示したものである。図-3 は、有義波高について、算定値と観測値が最も一致度の良かった組み合わせである NOAA WW3 と ECMWF ERA5 を用いた結果であり、図-4 の周期については、最も両者の一致度が良かった JMA GWM と ECMWF ERA 5 を用いた結果である。有義波高の算定値が良くなる全球波浪解析値の組合せと、周期の算定値が良くなる組み合わせは同じではなかった。(a)図は観測値と算定値の時系列、(b)図は散布図、(c)図は観測値と算定値の比を示したものである。

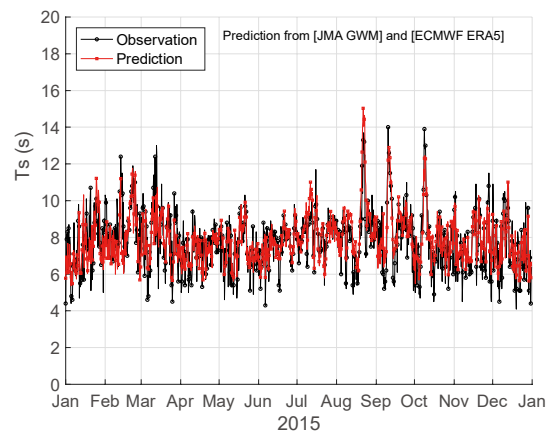
有義波高に関しては相関係数は 0.90、周期に関しては0.76 となっており、自乗平均平方根誤差は有義波高に対して 0.29 m、周期では 1.02 s となっており、図-2 に示した単独で用いる場合に比べて良くなっている。

(c)図を見ると、算定値は観測値に比べて、波高および周期が小さい時に大きくなり、逆に観測値が大きい場合に小さくなる傾向があることがわかる。有義波高に対しては、算定値の約 1.3 倍の値が観測値の 90% パーセンタイルになっており、周期では算定値の 1.2 倍の値が90% パーセンタイルであ

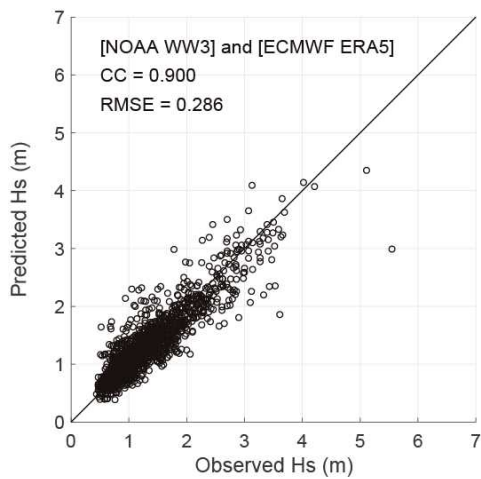
る。また、後に示す有義波高が 1 m 以下とした場合の的中率は、0.87 とかなり良い値になる。



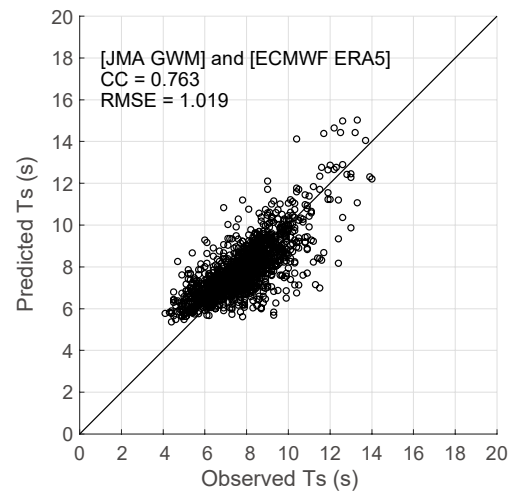
(a) 観測値と算定値の時系列



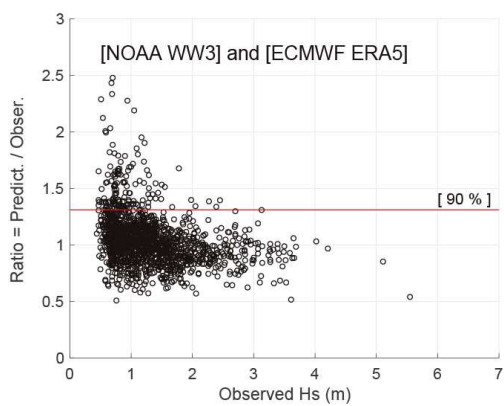
(a) 観測値と算定値の時系列



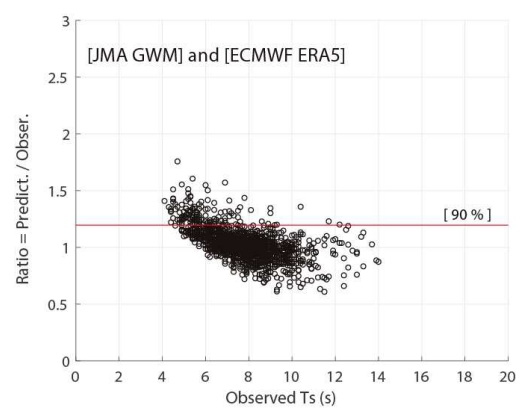
(b) 観測値と算定値



(b) 観測値と算定値



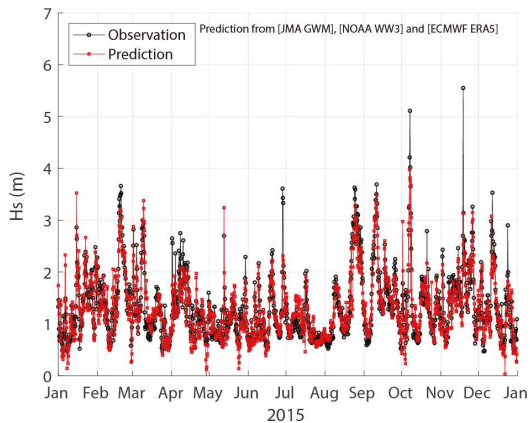
(c) 観測値と算定値の比



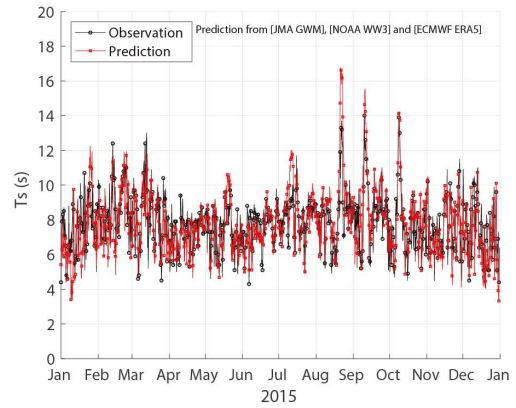
(c) 観測値と算定値の比

図-3 NOAA WW3 と ECMWF ERA5 の解析値を用いた有義波高の算定値と観測値の比較 (常陸那珂)

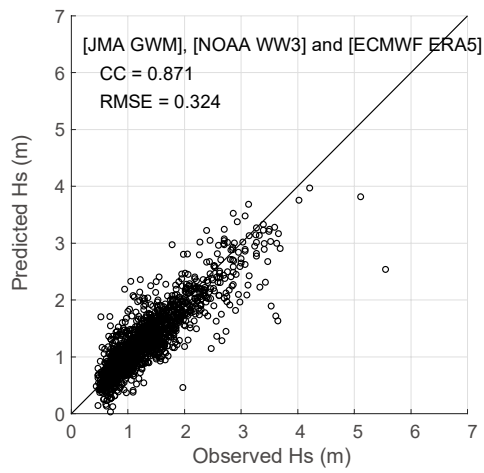
図-4 JMA GWM と ECMWF ERA5 の解析値を用いた有義波周期の算定値と観測値の比較 (常陸那珂)



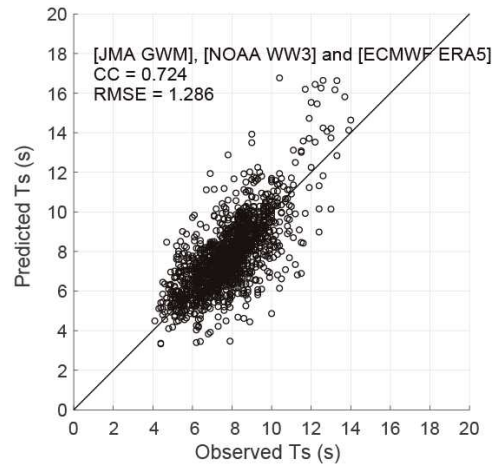
(a) 観測値と算定値の時系列



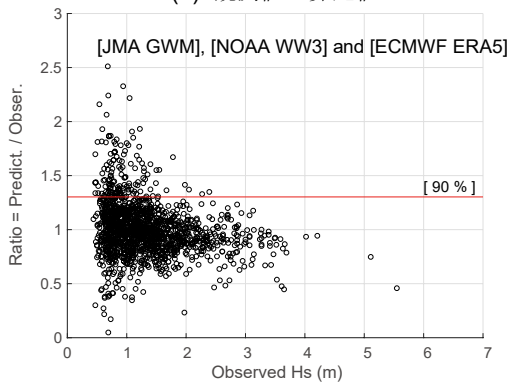
(a) 観測値と算定値の時系列



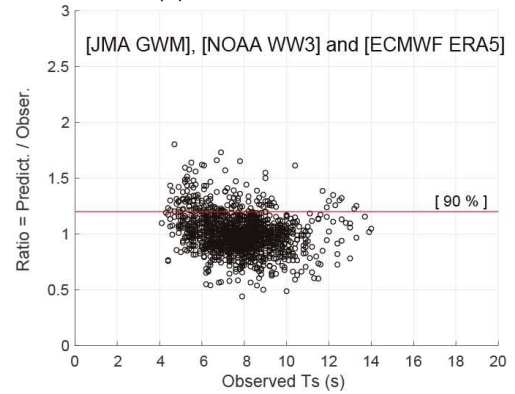
(b) 観測値と算定値



(b) 観測値と算定値



(c) 観測値と算定値の比



(c) 観測値と算定値の比

図-5 3種類の全球波浪解析値を用いた有義波高の算定値と観測値の比較 (常陸那珂)

図-6 3種類の全球波浪解析値を用いた周期の算定値と観測値の比較 (常陸那珂)

図-3 および図-4 の有義波高 (m) と周期 (s) の算定式は、以下の通りである。

$$H_{S(WW3+WAM)} = -0.123 - 0.137H_{S(WW3)} + 1.285H_{S(WAM)} - 0.154H_{S(WW3)}H_{S(WAM)} - 0.276H_{S(WW3)}^2 + 0.401H_{S(WAM)}^2 \quad (12)$$

$$T_{S(GWM+WAM)} = 4.523 - 0.496T_{p(GWM)} + 0.660T_{m01(WAM)} - 0.037T_{m02(GWM)}T_{m01(WAM)} - 0.021T_{m02(GWM)}^2 + 0.008T_{m01(WAM)}^2 \quad (13)$$

図-5 および図-6 は、3種類の全球波浪データを用いたときの算定値と観測値を比較したものである。これらの結果を図-3 および図-4 の結果と比べると、算定値と観測値との対応は少しだけ悪くなった。したがって、常陸那珂において 1 週間程度の波浪予測値を得るにあたっては、波高に対しては NOAA WW3 と ECMWF ERA5 を使い、周期については JMA GWM と ECMWF ERA 5 を用いた式(12) および式(13) を用いるのが良いことがわかった。

表-3 は、算定値の精度をまとめたものである。CC は相関係数、RMSE は自乗平均平方根誤差、BM は平均値バイアス、RSSR は次式で表される自乗和比である。

$$RSSR = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N R_i^2}{\sum_{i=1}^N O_i^2}} \quad (14)$$

ここで、 R_i は算定値、 O_i は観測値、 N はデータ数である。各項目の上段の値は波高に関して、下段の値は周期に関しての指標を示している。また、実際の海洋工事において工事の可否判断となることが多い、波高が 1 m 以下と算定したときにそれがあっているかどうかの的中率も示してある。

この表-3 から、常陸那珂を対象とする場合、波高に関して CC, RMSE, BM を参考にして NOAA WW3 と ECMWF ERA5 の組合せ、周期に関しては JMA GWM と ERA5 の組合せが良いことが改めてわかる。なお、それらの誤差指標の値よりは若干悪くなるが、3つの全球波浪データを使うことも可能である。

いずれにせよ、GMDH の部分表現式を用いることにより、単独で全球波浪データを使う場合に比べて精度良く 1 週間先までの波浪予測ができる可能性がわかった。

表-3 観測値と算定値の一致度の指標 (上段：波高, 下段：周期)

	JMA GWM	NOAA WW3	ECMWF ERA5	GWM+WW3	GWM+ERA5	WW3+ERA5	GWM+WW3+ERA5
Correlation Coefficient, CC	0.821 0.573	0.786 0.377	0.897 0.748	0.824 0.557	0.893 0.763	0.900 0.706	0.871 0.724
Root Mean Square Error, RMSE	0.667 m 2.189 s	0.488 m 3.256 s	0.290 m 1.681 s	0.418 m 1.286 s	0.295 m 1.019 s	0.286 m 1.212 s	0.324 m 1.286 s
Root Sum Square Ratio, RSSR	1.799 1.385	1.275 1.614	0.969 0.695	0.713 0.969	0.982 1.013	0.980 1.075	0.941 1.008
Bias of Mean, BM	0.491 m 1.323 s	0.180 m 1.909 s	0.012 m -1.314 s	-0.193 m -0.026 s	0.013 m 0.092 s	0.009 m 0.304 s	-0.025 m -0.030 s
Hit Rate (Hs<1m), HR	0.982	0.861	0.880	0.665	0.870	0.869	0.832

本研究では、波浪データとして入手が容易な過去の予報初期値と解析値を利用したが、今後、6時間おきに配信される実際の全球波浪予報値を用いて実際に週間予測値を算出し、観測値との比較を行いたい。

2.4 まとめ

本研究は、作業船の準備や港湾・海洋工事の施工計画に役に立つ波浪予測システムを確立することを目的として、全球波浪予報値と Group Method of Data Handling における部分表現式を用いた1週間先までの波浪予測が可能なモデルを構築し、過去の予報初期値 (JMA GWM, NOAA WW3) と解析値 (ECMWF ERA5) を用いて精度検証を行った。主要な結果は、以下のようである。

- 1) 1週間先までの波浪予報値には日本気象庁の全球波浪数値予報モデル JMA GWM, アメリカ海洋大気庁の全球波浪予報モデル NOAA WW3 および欧州の海洋波浪モデル ECMWF HRES-WAM があるが、日本沿岸における有義波高および周期の予報値としていずれかの予報値を単独で用いると、欧州の全球波浪モデルの有義波高値を除いて、その精度は良くなかった。
- 2) 2種類の全球波浪解析値を用いて算定値を求めた場合、有義波高について最も一致度の良かった組み合わせはアメリカ海洋大気庁のモデルと欧州の海洋波浪モデルを用いたものであり、周期については、日本気象庁のモデルと欧州のモデルを用いたものであった。
- 3) 3種類の全球波浪データを用いることにより精度が良くなるのではないかと予想したが、2種類の組合せによる算定値より精度は良くならなかった。
- 4) 常陸那珂においては、式 (12) および式 (13) で示される算定値を用いれば、有義波高に関しては相関係数は 0.90, 周期に関しては0.76, 自乗平均平方根誤差に関しては波高で 0.29 m, 周期で 1.02 s, 1.0 m 以下の作業可能波浪と算定した場合の的中率は 0.87 とかなり良いことがわかった。

3. 全球波浪予報値とニューラルネットワークを用いた1週間波浪予測法とその精度検証

3.1 目的

現在、気象庁は全球波浪数値モデルにより1日4回、0時 (UTC) には 264 時間先、6, 12, 18 時 (UTC) には 132 時間先予報値を提供している。米国 NOAA では180時間先まで、ヨーロッパ中期予報センターでは1日2回、0時と12時 (UTC) に 240 時間先までの全球波浪予報値が提供されているが、1週間程度先までの予測情報の精度は定かでない。

本研究は、ニューラルネットワーク (以後 NN と略す) を用いて、全球波浪予報値から日本沿岸海域の1週間先までの精度の良い波浪予測値を得る方法の開発を目指すものである。2. では、Group Method of Data Handling (GMDH) を用いた予測手法を開発したが、ここでは NN の適用を試みて、GMDH手法との比較も行う。NN に与える入力は多くても3種類の全球波浪予報値を使うだけのユニッ

ト数が小さなものであり、入力と出力の変換がうまく表されると期待され、期待通りならば1週間波浪予測が簡便に行えるようになる。

3.2 NN による1週間波浪予測

NN による情報処理は、並列分散処理と階層構造を持つ人の脳を模したものであり、データ間の因果関係が不明確で入出力関係のプログラム化が不可能であっても繰り返し学習によりその入・出力関係を具現化できるので、因果関係が解析困難なデータの処理に有効である。

ユニット数が少なく2層程度のニューラルネットワークではうまくいった^{10), 11), 12)}が、それ以上の多層でユニット数が多くなると期待した結果が得られないことなどから次第に下火になった。2000年代では時代遅れと思われる風潮にあったが、Deep Learning の進展に伴って、NN を利用する研究も再び行われるようになってきた^{13), 14), 15)}。

従来の NN を利用する研究は、対象とする内容をうまく設定すれば、あとは試行錯誤で良い結果を得られることができる。その結果は実行ファイルとして保存できるので、利用する際には入力を与えるだけで良い。本研究では、以下のようにNNを利用する。

(1) 本研究で用いる NN の構成

本研究は、図-7 に示す3層の階層型ニューラルネットワークを用いる。入力層に与えるデータは、(2)で説明する3種類の全球波浪予報値であり、単独で使ったり、組合わせて使う。入力層に与えられる入力データ（学習パターン）と同時に、学習の指針として望ましい出力値（教師信号）を与え、ネットワークからの出力信号と教師信号との誤差をフィードバックすることにより、教師信号に近い値が出力できるようにネットワークを調整する教師付き学習（バックプロパゲーション）を用いる。バックプロパゲーションアルゴリズムには多くの種類があるが、ここではスケーリング共役勾配法（SCG法）と早期停止、Levenberg-Marquardt法（LM法）と最適正則化法の Bayesian 法を用いて過学習を防いだ。

中間層は1層とし、ユニット数は5および10の2通りを用いた。応答関数はシグモイド関数を用いた。

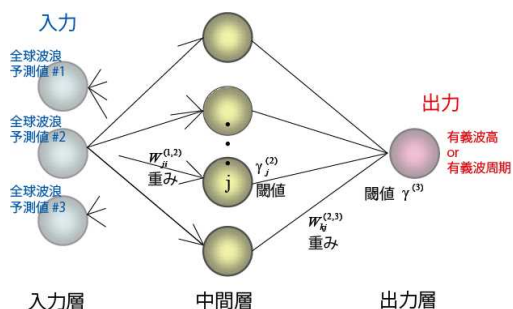


図-7 全球波浪予報値を入力とするニューラルネットワーク

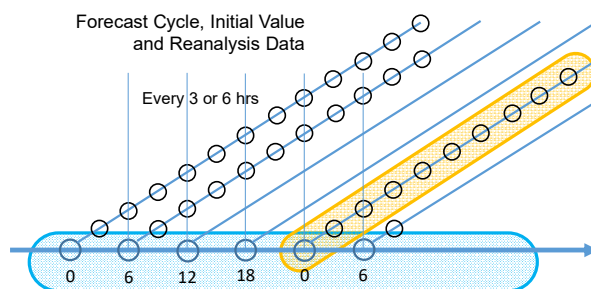


図-8 全球波浪モデルによる予報初期値、解析値および予報値

(2) 用いる全球波浪データ

入力に用いる全球波浪予報値は、日本気象庁波浪モデルによる JMA GWM (H_s, T_p), アメリカ海洋大気庁海洋モデルによる NOAA WW3 (H_s, T_{m02}), ヨーロッパ中期予報センター波浪モデルによる ECMWF HRES-WAM (H_s, T_{m01}) の3種類を想定している。

これらのデータの概要は、2章の表-1 にまとめられている。 H_s は有義波高であり、 T_p は卓越波向きのエネルギースペクトルが最も大きくなる周期、 T_{m02} はスペクトルの0次および2次モーメントから得られる平均周期、 T_{m01} はスペクトルの0次および1次モーメントから得られる平均周期であり、それぞれの予報値で用いられている周期は有義波周期ではないことに注意する。予報時間長さは最も短いもので180時間あり、いずれも1週間（168時間）以上である。

本研究で実際に使う全球波浪予報データは、図-8 に示した水色で囲んだ予報初期値や解析値を用いる。すなわち、全球波浪値があるその時刻に対する日本沿岸の対象とする地点での波浪を算定するものである。予報値が入手できれば、その時刻の沿岸波浪を予測することになる。

入力変数とする全球波浪値は、表-4 に示す7通りを採用し、どのケースが対象地点の波浪観測値を精度よく予測できるかを検討した。Case 1~3 は単一の全球波浪値を使うものであるが、NNを用いる非線形変換によって良い予測値を得られるかを検討するためのケースである。Case 4~6 は2種類の全球波浪データから予測値を得るためのケース、Case 7 は3種類の全球波浪データをNNによる非線形変換により波浪予測値を得るためのケースである。

表-4 NNモデルに用いる入力変数と出力

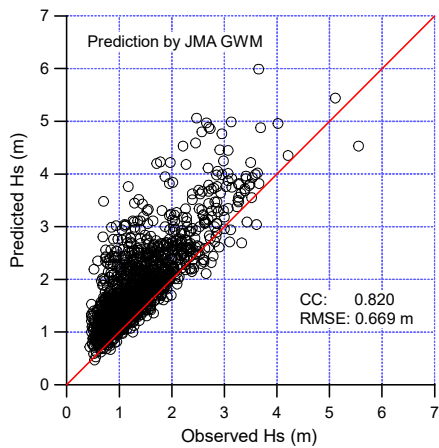
Case	入力変数	出力変数
1	JMA GWM	NOWPHAS
2	NOAA WW3	NOWPHAS
3	ECMWF ERA5	NOWPHAS
4	JMA GWM + NOAA WW3	NOWPHAS
5	JMA GWM + ECMWF ERA5	NOWPHAS
6	NOAA WW3 + ECMWF ERA5	NOWPHAS
7	JMA GWM + NOAA WW3 + ECMWF ERA5	NOWPHAS

(3) 解析条件

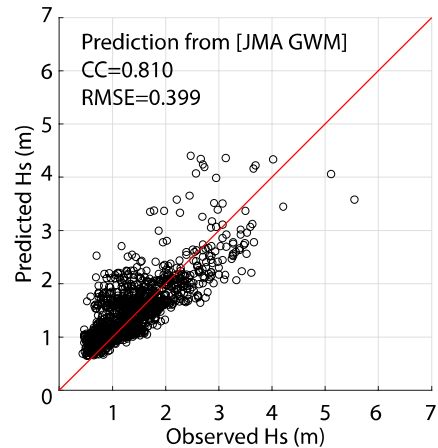
今回用いた全球波浪値と波浪観測値の期間は、2010年1月1日から2015年12月31日の6年間で、時間間隔は6時間である。また、検討対象とした日本沿岸の地点は、ナウファス¹⁶⁾の常陸那珂である。常陸那珂の波浪計設置位置は ($36.395^\circ, 140.653^\circ$) であるため、波浪値の出力位置として、JMA GWM ($36.5^\circ, 141.0^\circ$), NOAA WW3 ($36.5^\circ, 141.0^\circ$), ECMWF ERA5 ($36.36^\circ, 140.76^\circ$) を用いた。

全球波浪データ ECMWF ERA5 を用いたのは、過去の解析値が ECMWF HRES-WAM より入手が容易であったことによる。なお、ECMWF ERA5 が ECMWF HRES-WAM と異なるのは、格子間隔が $0.36^\circ \times 0.36^\circ$ 、周波数・方向スペクトルの分割数がそれぞれ 30 と 24、外力の格子間隔が $0.281^\circ \times 0.281^\circ$ となる点である。

NN モデルを構築するに当たり、訓練データとして 2010年1月1日から2013年12月31日の4年間、バリデーションデータとして2014年1月1日から12月31日の1年間を用いた。2015年のデータはテストデータとして用いた。

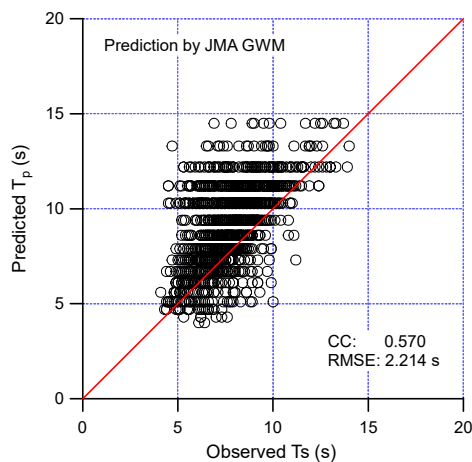


(a) JMA GWM の値と観測値の比較³⁾

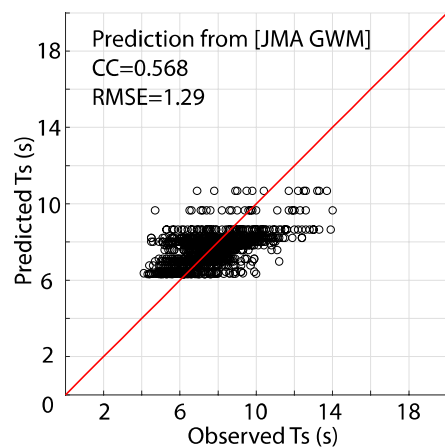


(b) NN による算定値と観測値の比較

図-9 全球波浪値 JMA GWM, その NN による算定値および観測有義波高との比較



(a) JMA GWM の値と観測値の比較³⁾



(b) NN による算定値と観測値の比較

図-10 全球波浪値 JMA GWM, その NN による予測値および観測有義波周期との比較

3.3 解析結果

2章では、はじめに常陸那珂における全球波浪解析値と波浪観測値（ゼロアップ法で定義された有義波高と有義波周期であり、これらも以後 H_s , T_s と表す）の比較を行った。その結果、JMA GWM および NOAA WW3 の解析値は、 H_s および T_s とともに解析値が観測値よりかなり大きくなっていること、ECMWF ERA5 の H_s の解析値は観測値と良く一致しているが、 T_s については、定義の相違もあるが、観測値より一般的に小さくなっていること、全球スケールの波浪予報値はその空間解像度のために日本沿岸での波浪の予報値としては精度が落ちると考えられることを述べた。

図-9 は、全球波浪値 JMA GWM とそれを入力とした NN による予測値を観測有義波高 H_s と比較したものである。ただし、ここで用いた NN は、中間層ユニット数を10、訓練は SCG と早期停止を用いたものである。この図によると、NN による算定値は元の JMA GWM の値に比べて算定精度が向上しているのがわかる。しかしながら、周期に関しては、図-10 に示すように JMA GWM の値よ

りは良くなっているが、相関係数の値をみてもわかるように算定値と観測値の一致の程度はあまり良くなっていない。

表-5 は NN による波浪算定値と観測値との相関係数を示したものである。(a) および (b) はそれぞれ (LM法+Bayesian正則化法) および (SCG法+早期停止法) を用いた訓練を行った結果であり、中間層ユニット数は 5 と 10 とし、表-4 の 7 つのケースについて、上段の表は有義波高、下段の表は有義波周期についてまとめたものである。この表によれば、訓練による結果の差はほとんど見られないことがわかる。また、中間層ユニット数の影響もほとんどないが、今後用いる全球波浪予報値を増やす場合には中間層ユニット数が多い方が良いと考えられるので、本研究では中間層として10を用いることを提案する。

比較結果を詳細に調べてみると、3 種類の全球波浪解析値を用いるのが最も良い結果が得られるのではないかと考えたが、表-5 から、有義波高に関して、NOAA WW3 と ECMWF ERA5 を用いるのが最も良い結果が得られることがわかった。有義波周期に関しては、JMA GWM と ECMWF ERA5 を用いる場合が最も良い結果が得られた。この結果は、2章の結果と同じであった。

JMA GWM と NOAA WW3 の解析値は有義波高および周期ともに観測値より大きくなるが、ECMWF ERA5 は有義波高に対しては前者2つの全球波浪値より小さめに、有義波周期については観測値より小さめになる。すなわち、JMA GWM と NOAA WW3 の波と周期の解析値は同じ大きくなる傾向を有するので、GMDH や NN を用いて観測値を算定する場合には、傾向が同じである2種類の解析値を用いなくてもどちら1つだけを用いて良いことを示していると考えられる。

図-11と図-12 は、2種類の全球波浪解析値を用いて予測値を求めた場合の結果を示したものである。(a)図は観測値と算定値の時系列、(b)図は散布図、(c)図は観測値と算定値の比を示したものである。

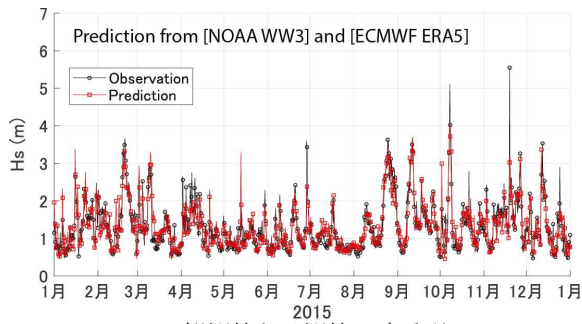
図-11 では、有義波高について算定値と観測値が最も一致度の良かった組み合わせである NOAA

表-5 NN モデルによる波浪算定値と観測値の相関係数

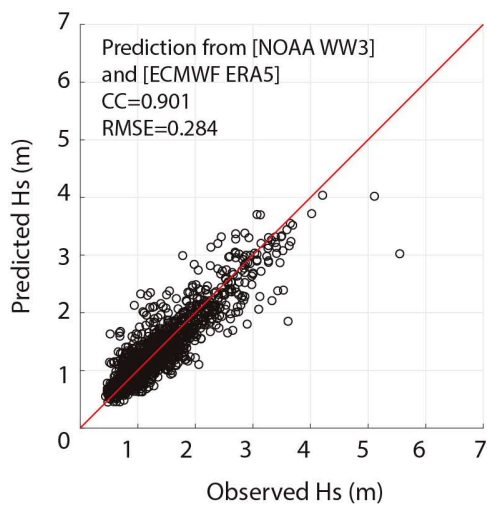
(a) ベイジアン正則化法				(b) 早期停止法			
Baysian Regulation				SCG + Early Stopping			
Wave Height				Wave Height			
Unit #		5	10	Unit #		5	10
1	GWM	0.819	0.817	1	GWM	0.818	0.810
2	WW3	0.785	0.784	2	WW3	0.777	0.780
3	ERA5	0.897	0.896	3	ERA5	0.895	0.896
4	GWM-WW3	0.811	0.811	4	GWM-WW3	0.808	0.812
5	GWM-ERA5	0.896	0.896	5	GWM-ERA5	0.896	0.895
6	WW3-ERA5	0.900	0.901	6	WW3-ERA5	0.900	0.901
7	GWM-WW3-ERA5	0.898	0.898	7	GWM-WW3-ERA5	0.898	0.898
Wave Period				Wave Period			
Unit #		5	10	Unit #		5	10
1	GWM	0.572	0.572	1	GWM	0.571	0.568
2	WW3	0.331	0.311	2	WW3	0.361	0.304
3	ERA5	0.743	0.743	3	ERA5	0.744	0.743
4	GWM-WW3	0.573	0.541	4	GWM-WW3	0.559	0.585
5	GWM-ERA5	0.764	0.764	5	GWM-ERA5	0.761	0.757
6	WW3-ERA5	0.734	0.739	6	WW3-ERA5	0.733	0.732
7	GWM-WW3-ERA5	0.757	0.756	7	GWM-WW3-ERA5	0.757	0.760

WW3 と ECMWF ERA5 を用いた結果であり、図-12 の周期については、最も両者の一致度が良かった JMA GWM と ECMWF ERA5 を用いた結果である。有義波高の算定値が良くなる全球波浪解析値の組合せと、周期の予測値が良くなる組み合わせは同じではなかった。この結果も、2章と同じである。

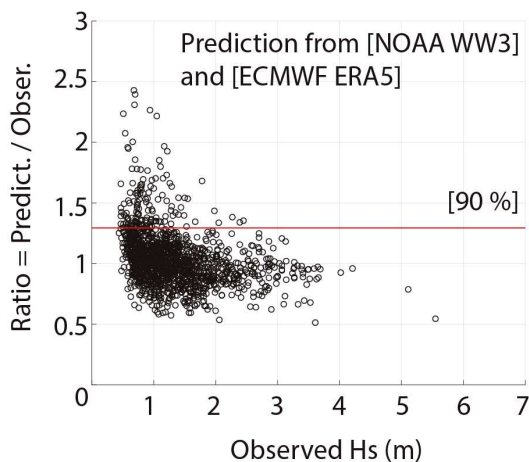
有義波高に関しては相関係数は 0.90、周期に関しては0.76、自乗平均平方根誤差は有義波高に対して 0.28 m、周期では 1.02 s となっており、図-9 および図-10 に示した単独で用いる場合に比べて良



(a) 観測値と予測値の時系列

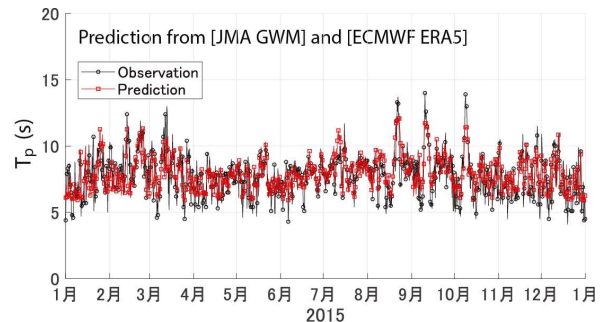


(b) 観測値と予測値

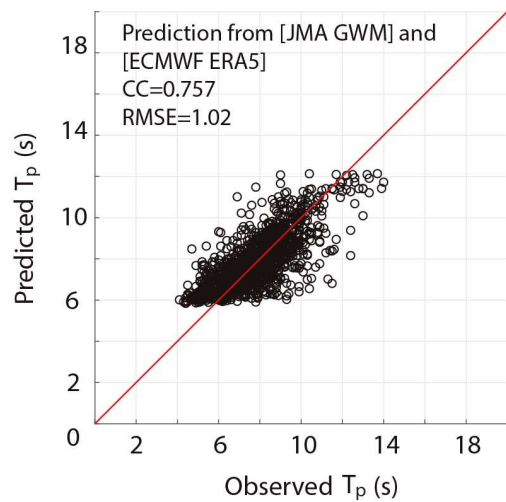


(c) 観測値と予測値の比

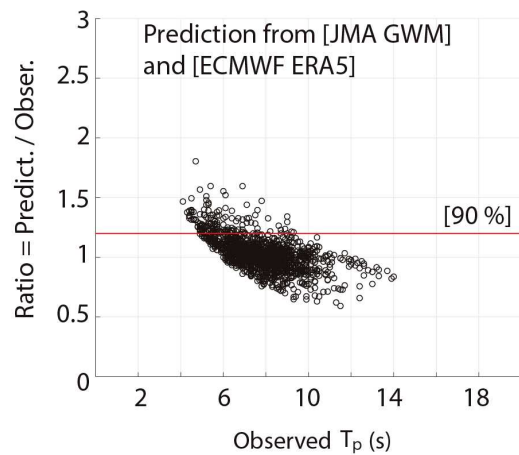
図-11 NOAA WW3 と ECMWF ERA5 を用いた有義波高の算定値と観測結果の比較



(a) 観測値と予測値の時系列



(b) 観測値と予測値



(c) 観測値と予測値の比

図-12 JMA GWM と ECMWF ERA5 を用いた有義波周期の算定値と観測結果の比較

くなっている。(c)図を見ると、算定値は観測値に比べて波高および周期が小さい時に大きくなり、逆に観測値が大きい場合に小さくなる傾向があることがわかる。有義波高に対しては算定値の約 1.3 倍の値が観測値の 90% パーセンタイルになっており、周期では算定値の1.2倍の値が 90% パーセンタイルである。

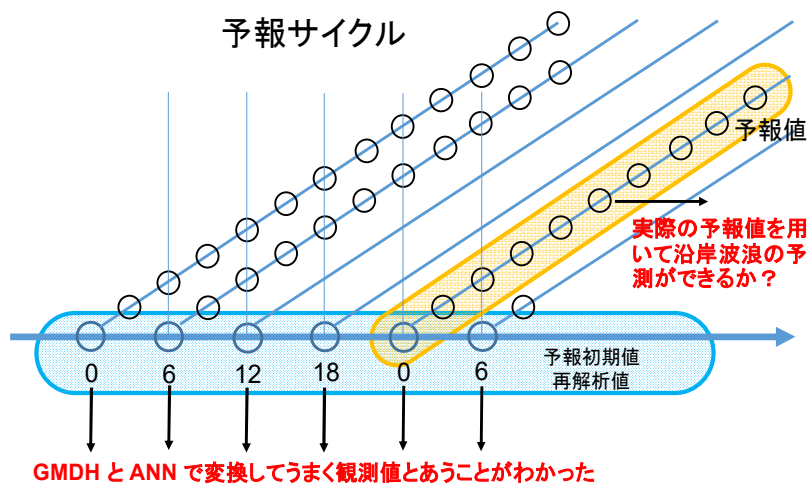
3.4 まとめ

海洋工事においては、リードタイムの長い海象情報は重要であることから、GMDH 法を用いた1週間波浪予測方法の研究に引き続いて、ニューラルネットワーク (NN) を利用した1週間の波浪予測法を目指し、その基礎となる精度検証を行った。主要な結果は、以下のようなものである。

- 1) 日本気象庁波浪モデル、アメリカ海洋大気庁波浪モデル、ヨーロッパ中期予報センター波浪モデルといった 3 種類の全球波浪モデルにより1週間先以上までの波浪予報値が得られるが、空間解像度が粗いため、日本沿岸の常陸那珂を対象とした場合、全球波浪予報値の精度はあまり良くなかった。
- 2) 単独の全球波浪予報値からでも NN を利用すれば、精度の良い波浪予測値に変換できる。
- 3) 有義波高に関しては、アメリカ海洋大気庁波浪モデルと欧州波浪モデルを用いて NN により算定値を求めるとかなり精度向上する。有義波周期については、日本気象庁波浪モデルと欧州波浪モデルを用いたものが最も精度が良くなる。
- 4) 3種類の全球波浪データを用いなくても、2種類の全球波浪データの組合せで算定値の精度は良くなった。

4. おわりに

GMDHとANNを用い1週間先までの予測値を求めることができることを確認し、方法論は有効であることを確認した。下図には、予報サイクルとともに、これまで行ったこと、これから行うことを示す。1) 本研究で行ったことは、予報初期値、再解析値を用いてGMDHとANN利用の妥当性を確かめた。2) 今後行うことは、実際の気象予報値を用いて、日本沿岸13か所で予報可能性を確かめる。



参考文献

- 1) Tom, T. H. A., 池本藍, 間瀬肇, 安田誠宏, 森信人: 台風シーズンにおけるリアルタイム波浪予測と精度検証, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 66, pp. 161-165, 2010.
- 2) 鈴木善光, 高山知司, 吉永泰祐, 岡田弘三, 窪田和彦, 宇都宮好博, 松藤絵理子, 君塚政文: WAM と WAVEWATCH III による推算波浪の再現特性, 土木学会論文集B3 (海洋開発), Vol. 72, No. 2, pp. I_265-I_270, 2016.
- 3) 間瀬肇, Tom, T. H. A., 池本藍, 川崎浩司: WAVEWATCH III を外部領域に用いた波浪予測システムの精度検証, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 73, No. 2, pp. I_139-I_144, 2017.
- 4) 青野利夫, 後藤智明, 佐藤一央: 沿岸波浪観測値を利用した重回帰波浪予測, 港湾技術研究所報告, Vol. 32, No. 3, pp. 39-64, 1993.
- 5) 津田宗男, 松見吉晴, 金洙列, 松田信彦, 江口三希子: 円滑な海上施工管理のための波浪と作業船の動揺のリアルタイム予測, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol. 73, No. 2, pp. I_151-I_156, 2017.
- 6) Ivakhnenko, A. G.: Heuristic self-organization in problems of engineering cybernetics, *Automatica*, Vol. 6, pp. 207-219, 1970.
- 7) Lee, S. B. and Suh, K.-D.: Development of wave overtopping formulas for inclined seawalls using GMDH Algorithm, *KSCE Journal of Civil Eng.*, pp.1-12, 2019. DOI: 10.1007/s12205-019-1298-1
- 8) 全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス): <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>, 参照2018-03-15.
- 9) 田村坦之, 近藤正: 最近の GMDH の方法論と応用, 日本オペレーションズ・リサーチ学会機関誌, Vol. 23, pp. 104-111, 1978.
- 10) Mase, H., Sakamoto, M. and Sakai, T.: Neural network for stability analysis of rubble-mound breakwaters, *J. Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, ASCE, Vol.121, No.6, pp.294-299, 1995.
- 11) 間瀬肇, 酒井哲郎: ニューラルネットワークを用いた消波ブロック被覆工の変形量評価, 海岸工学論文集, 第42巻, pp.891-895, 1995.
- 12) 間瀬肇: 混成防波堤における衝撃砕波力の発生判定モデル, 土木学会論文集, 第515号, II-31, pp.95-102, 1995.
- 13) 斎藤武久, 小久保元貴, 間瀬肇: ニューラルネットワークを用いた日本海沿岸域でのうねり性高波浪の予測に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 72, No. 2, pp. I_175-I_180, 2016.
- 14) 五十嵐雄介, 田島芳満: ニューラルネットワークによる日本沿岸の波浪の推定に関する検討, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol.74, No.2, pp.I_685-I_690, 2018.
- 15) Tracey H.A. Tom, 間瀬 肇, 池本 藍, 齋藤武久, 川崎浩司, 武田将英: 日本海上の気象データを用いたニューラルネットワークによる日本海沿岸の波浪予測、土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.74, No.2, pp.I_691-I_696, 2018.
- 16) 全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス): <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>, 参照2019-04-15.

謝辞:本研究は,(一財)港湾空港総合技術センター研究開発助成による研究成果の一部であり,ここに謝意を表します.また,本研究を行うに当たり,ナウファスのデータを使用いたしました.関係者の皆様には波浪観測結果の利用に関しましてお世話になりましたことを感謝いたします.